



**Герта Семеновна
Кандаурова**

Доктор физико-математических наук, профессор кафедры магнетизма Уральского университета, заслуженный деятель науки РФ, чл.-кор. РАЕН, Соросовский профессор

ХАОС, ПОРЯДОК И КРАСОТА В МИРЕ МАГНИТНЫХ ДОМЕНОВ¹

*Светлой памяти профессора
Бердышева Анатолия Алексеевича.*

Введение

Физика магнитных явлений составляет крупный раздел естествознания. Магнитные материалы находят самое широкое применение в технике. В то же время в школьных программах магнетизму отводится очень мало места, а некоторые вопросы, например, физика магнитных доменов, и вовсе опущены. Данная статья в некоторой степени восполняет этот пробел.

Известно, что подавляющее большинство магнитных материалов являются ферромагнитными сплавами на основе железа (Fe), кобальта

(Co), никеля (Ni) или ферримагнитными окислами — ферритами. Атомы указанных элементов обладают магнитными моментами, т.е. подобны микроскопическим магнитным стрелкам. В ферромагнетике эти моменты из-за специфических квантовых взаимодействий выстроены параллельно. В результате возникает макроскопическая спонтанная намагниченность² J_s . В ферримагнетиках упорядочение атомных магнитных моментов более сложное, но в результате также создается спонтанная намагниченность.

Как правило, кристаллы ферро- и ферримагнетиков состоят из маг-

¹ Вариант статьи отправлен в «Соросовский образовательный журнал» в 1996 г.

² Под спонтанной намагниченностью J_s будем понимать векторную сумму магнитных моментов m в некотором достаточно малом объеме вещества, отнесенную к этому объему, т.е. $J_s = \frac{1}{\Delta V} \sum m$. О квантовой природе спонтанной намагниченности см. [1, 2].

нитных доменов. Каждый домен — это область, намагниченная до насыщения однородно, т.е. векторы \mathbf{J}_s , построенные в разных точках домена, параллельны. Форма доменов, их размер, взаимное расположение доменов и доменных границ (стенок) — все это входит в понятие «доменная структура» (ДС) магнетика. Впервые магнитные домены увидели в 1931—1932 гг. и с тех пор исследования ДС путем непосредственного наблюдения доменов шли с нарастающей интенсивностью. Обнаружилось огромное разнообразие ДС в кристаллах различных веществ. Более того, оказалось, что для одного и того же вещества, но в образцах разного размера и формы, ДС может быть совершенно различной. Своеобразные домены наблюдаются в поликристаллических и аморфных тонких слоях, лентах и пленках с наведенной магнитной анизотропией. Добавим еще, что домены различаются не только по виду, но и по своим свойствам. Например, есть ДС, исключительно чутко откликающиеся на внешние воздействия, особенно на магнитные поля. И наоборот, есть структуры, изменить которые очень трудно. Таким образом, можно говорить о целом мире магнитных доменов [2].

Показать все особенности мира магнитных доменов в одной статье невозможно. Но можно показать идеальный порядок или, наоборот, полный беспорядок (хаос) в системе доменов. Надо только решить хотя и трудную, но посильную задачу выбора и привести подходящие яркие примеры. Мож-

но проанализировать объективные причины, определяющие порядок и беспорядок в массиве доменов, указать условия, при которых реализуются переходы «хаос \rightleftharpoons порядок», выделить основные факторы, влияющие на вид и поведение доменов.

Но как быть с красотой доменных картин? Выбор их и оценки целиком субъективны и об этом я хочу предупредить читателя. Однако есть еще большая трудность. Например, ДС кристалла может самым причудливым образом изменяться в магнитном поле. При последовательном изменении напряженности магнитного поля¹ H от $+H_s$ — значения поля насыщения одного направления до $-H_s$ — поля противоположного направления домены «рождаются», растут, развиваются, начинают взаимодействовать друг с другом, изменяют свою форму и размеры. Потом те домены, в которых намагниченность \mathbf{J}_s ориентирована удачно относительно поля (напр., $\mathbf{J}_s \uparrow \uparrow \mathbf{H}$), постепенно поглощают соседние домены (с $\mathbf{J}_s \uparrow \downarrow \mathbf{H}$). Как показать захватывающую красоту этой «живой», динамичной картины, если для иллюстрации приводятся две-три застывших фотографии? Остается лишь надеяться, что эти фотографии вместе с моими комментариями разбудят воображение и фантазию читателя, и весь процесс перестройки ДС он дорисует сам. Может быть, он удивится красоте, спрятанной в магнитном кристалле, и захочет узнать о мире магнитных доменов как можно больше.

¹ Напряженность магнитного поля H связана с индукцией магнитного поля B соотношением $B = \mu_0 \mu H$, где μ_0 — магнитная постоянная, μ — относительная магнитная проницаемость среды. H_s — это поле, в котором намагниченность \mathbf{J} , т.е. магнитный момент единицы объема образца, достигает максимального значения — намагниченности насыщения, практически равной \mathbf{J}_s .

1. Предварительные необходимые сведения (что надо знать, прежде чем смотреть на картины магнитных доменов?)

1.1. Магнитная анизотропия

Векторы спонтанной намагниченности в кристалле ориентируются не как угодно, а строго вдоль определенных кристаллографических осей. Их называют осями легкого намагничивания (ОЛН), так как кристалл в этих направлениях намагничивается легче (в меньших полях), чем в любых других. В этом проявляется естественная магнитокристаллическая анизотропия. Количество ОЛН в разных магнетиках различно. Например, железо (Fe) имеет кубическую кристаллическую решетку, и ОЛН служат ребра куба. Их обозначают [100], [010] и [001], так что у Fe три естественных ОЛН. Никель (Ni) также имеет кубическую решетку, но ОЛН являются пространственные диагонали куба, их четыре. Кобальт (Co) имеет гексагональную кристаллическую решетку и единственную ОЛН — гексагональную ось. Кристаллы различных веществ по характеру магнитной анизотропии могут быть подобны Fe или Ni и их называют магнитомногоосными, а те, которые подобны Co, — магнитоодноосными.

Наряду с естественной магнитной анизотропией в кристалле можно искусственно создать так называемую наведенную магнитную анизотропию. Например, в монокристаллическом образце Fe в форме сферы (это изотропная форма) три ОЛН

— [100], [010] и [001] — равноправны. Но в образце в форме тонкой пластинки, перпендикулярной оси [001], эта ось уже не является ОЛН. Действительно, намагнитить пластинку вдоль этой оси гораздо труднее, чем вдоль осей [100] и [010], лежащих в плоскости пластинки. Так, из-за анизотропии формы образец из магнитотрехосного стал магнитодвухосным. Если теперь пластинку слегка растянуть вдоль [100], т.е. создать одноосные упругие напряжения, то эта ось станет легкой, а образец — магнитоодноосным. Ниже (см. разд. 3) я покажу, как реагирует ДС на такие преобразования магнитной анизотропии.

1.2. Почему возникают магнитные домены?

Рассмотрим однородно намагниченный вдоль ОЛН кристалл (рис. 1а). В этом состоянии образец, подобно постоянному магниту, создает поле (H_m), обладающее большой энергией (E_m). Как любая термодинамическая система кристалл стремится перейти в равновесное состояние с минимумом энергии. Есть ли возможность уменьшить энергию E_m ? Да, есть. Эту энергию можно уменьшить примерно в два раза, если в образце возникнут два домена (рис. 1б)¹. Заметьте, если на рис. 1а образец намагничен до насыщения ($J=J_s$), то в состоянии на рис. 1б он размагничен ($J=0$). Отсюда понятно, почему поле H_m называют размагничивающим, а энергию E_m — магнитостатической, или размагничивающей, энергией. Можно и дальше понизить E_m , если увеличить число доменов (рис. 1в).

¹ Постоянные магниты специально изготавливают из таких материалов, в которых возникновение доменов затруднено в максимальной степени.

Однако, начиная с состояния на рис. 16, появляется новый объект — доменная граница («стенка»). В стенке происходит поворот \mathbf{J}_s от направления «вверх», до направления «вниз» (на рис. 16), т.е. отклонение \mathbf{J}_s от ОЛН и соответственно появление энергии магнитной анизотропии¹. Общая граничная энергия $E_\gamma = \gamma S$, где γ — энергия, приходящаяся на единицу площади стенки, S — суммарная площадь всех стенок. Таким образом, увеличивая число доменов, выигрываем в E_m и проигрываем в E_γ . В итоге в равновесном состоянии в кристалле сформируется такая ДС (с таким числом доменов), которая обеспечивает минимум его суммарной энергии [1-3].

1.3. Как увидеть магнитные домены?

На сегодня существует довольно много способов наблюдения ДС.

Выделим два из них, которые используются наиболее часто.

Метод магнитной суспензии (метод порошковых фигур). На полированную поверхность образца наносится тонкий слой магнитной суспензии. Частицы суспензии собираются в тех местах, где поле H_m наиболее неоднородно, а напряженность его максимальна. Обычно эти места соответствуют выходу доменных стенок на наблюдаемую в микроскоп поверхность образца.

Магнитооптические методы. Для выявления ДС используются магнитооптические эффекты. Суть их заключается в том, что при прохождении плоско-поляризованного света через многодоменный кристалл плоскость поляризации поворачивается в доменах с разной ориентацией \mathbf{J}_s на разные углы (эффект Фарадея). Аналогичной будет ситуация при отражении света от многодоменной поверхности (эффект Керра).

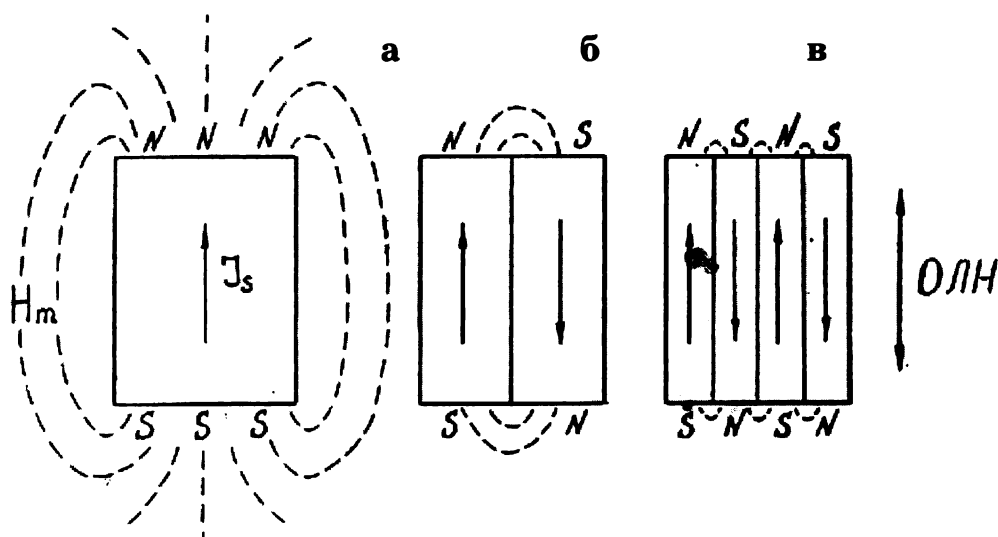


Рис.1. Схема образования магнитных доменов

¹ Строго говоря, из-за нарушения параллельности векторов \mathbf{J}_s добавляется еще и так называемая обменная энергия. Подробнее см. [1-3].

Поставив на пути прошедшего (или отраженного) света анализатор и подобрав подходящую ориентацию его плоскости пропускания, можно загасить свет от одной группы доменов и пропустить его от другой. Тогда возникнет контрастная картина ДС, которую можно наблюдать в микроскоп и фотографировать.

2. Домены в монокристаллических образцах с двумя осями легкого намагничивания

На рис. 2а показана ДС кристалла железа в форме тонкой квадратной пластинки. Стороны пластинки, размером 60 мкм и толщиной 0,5 мкм, параллельны осям легкого намагничивания $[100]$ и $[010]$ ¹. Структура сквозная, идеальной геометрии. Четыре домена в этом «конверте» разделены 90-градусными стенками². Интересно, что после намагничивания в поле H , направленном по оси $[100]$, в этом же образце формируется другая ДС (рис. 2б). Здесь есть

и 90-градусные и 180-градусные стенки. Из сопоставления рис. 2а и 2б нельзя не увидеть сильнейшее влияние магнитной предыстории на конфигурацию доменов.

Совершенно преобразуется ДС, если в пластинке две ОЛН — $[100]$ и $[010]$ не параллельны ее сторонам. Например, на рис. 3а показана ДС кристалла-пластинки, в которой ОЛН направлены под углом 45° к верхней и нижней сторонам образца. На рис. 3б дана расшифровка данной ДС. Отличие этой ДС от ДС, изображенных на рис. 2, просто поразительно. На рис. 3 видна красивая, похожая на гармошку, ДС. Это весьма своеобразная ДС. Она состоит из 3 крупных макродоменов, разделенных 180-градусными зигзагообразными стенками, а каждый макродомен составлен из большого количества (белых и черных на рис. 3а) более мелких микродоменов с 90-градусными стенками. Запомним этот первый пример иерархии в системе магнитных доменов.

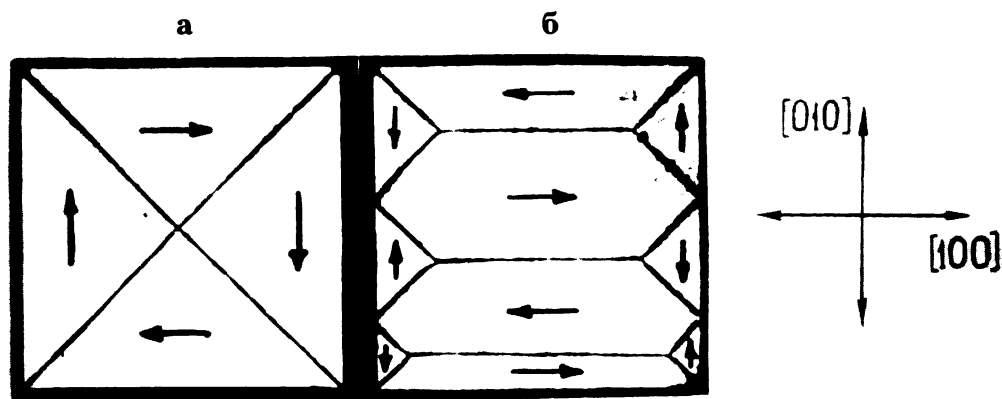


Рис. 2. Доменная структура пластинки железа. Стрелками обозначены векторы J в доменах. Домены выявлены с помощью магнитной суспензии

¹ Третья ось $[001]$ из-за анизотропии формы не является ОЛН (см. п.1.3).

² Градусность доменных границ (стенок) — это угол между векторами J в соседних доменах.

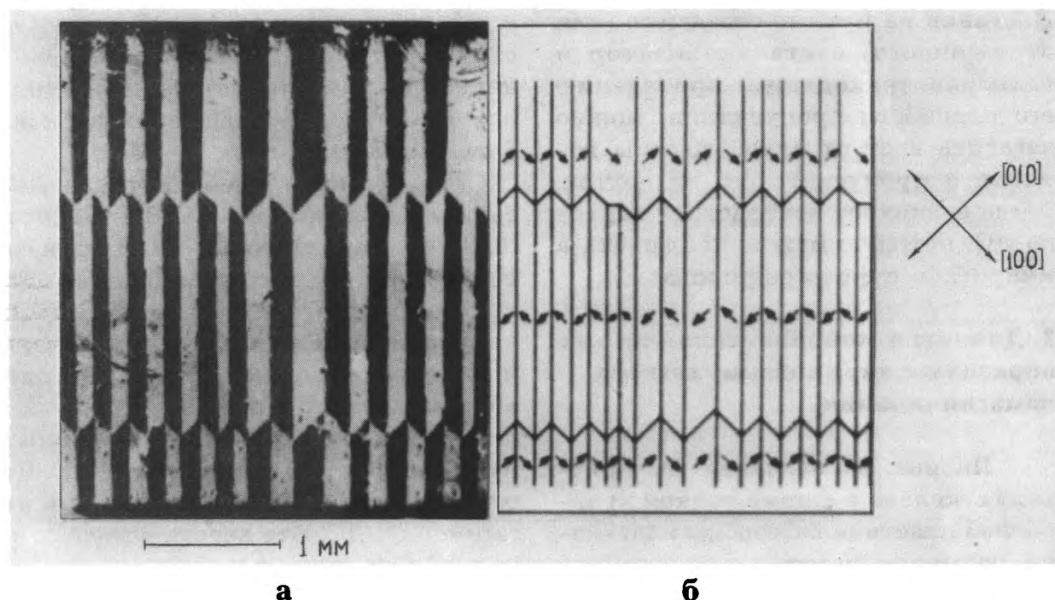


Рис.3. Доменная структура кристалла Fe-Si (2,5 %), выявленная с помощью эффекта Керра (а), и ее расшифровка (б). Стрелками обозначены векторы J ,

Все ДС на рис. 2 и 3 строго упорядочены в том смысле, что домены и их стенки направлены по определенным кристаллографическим осям и плоскостям. Такой порядок сохраняется и в процессе перестройки ДС, вызванной какими-то причинами. Например, на рис. 4 показано изменение ДС кристалла¹ с ОЛН [100] и [010], лежащими в плоскости образца, при растяжении вдоль оси [100]. Видно, что с увеличением нагрузки ось [100] становится легкой, постепенно (рис. 4 б,в) исчезают домены с J_z , направленным по другой ОЛН — [010], и ДС приобретает вид, типичный для кристаллов с одной ОЛН (рис. 4 г). Если на рис. 4а-в есть и 180- и 90-градусные стенки, то на рис. 4г — только 180-градусные.

Все структуры на рис. 2—4 сквозные. Простота этих ДС, полное

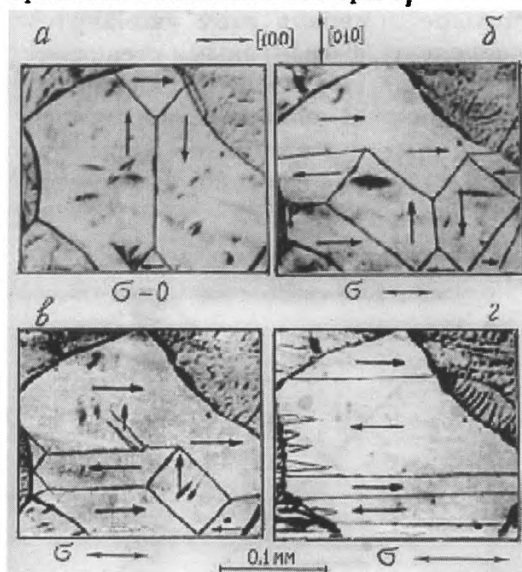
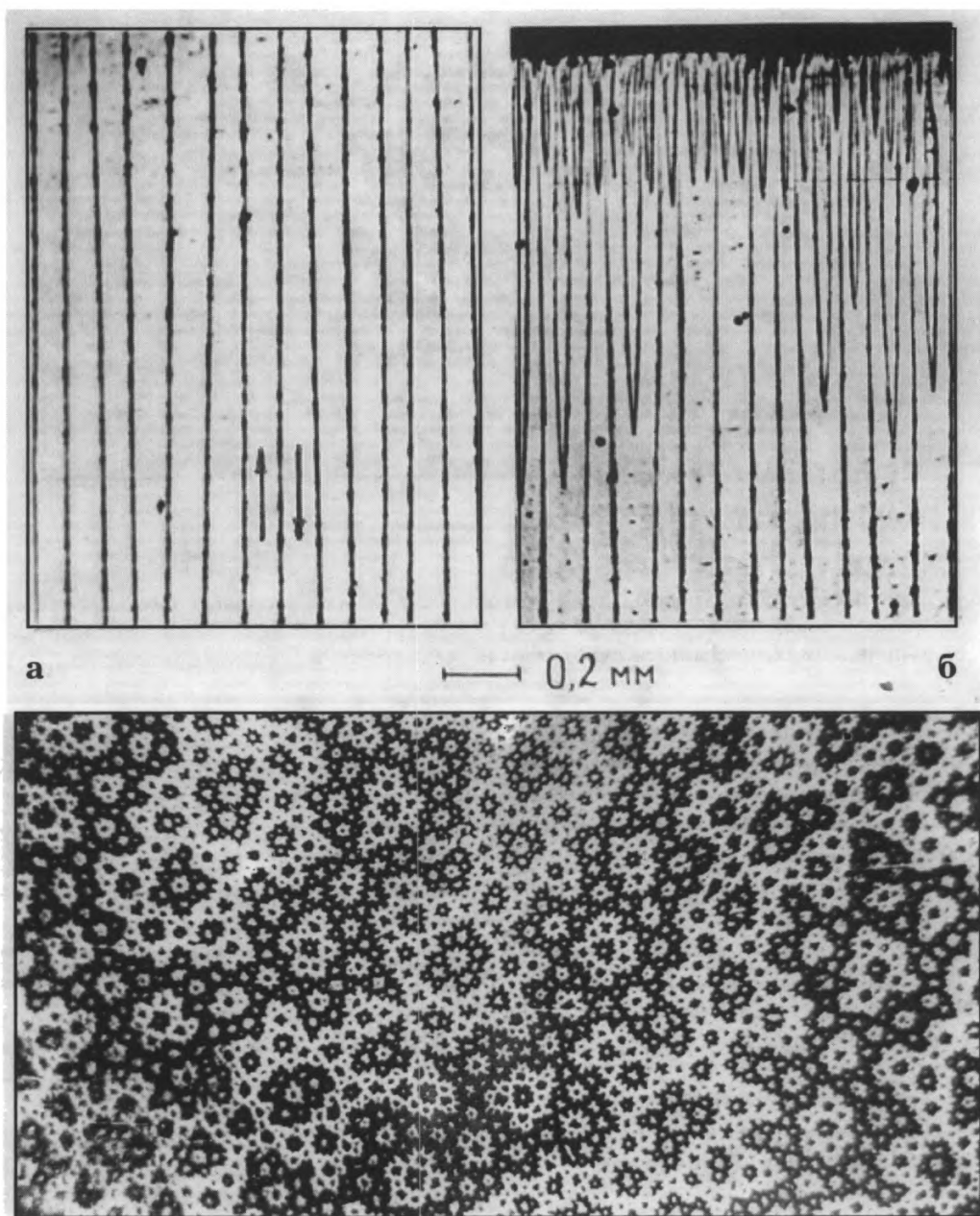


Рис.4. Изменение доменной структуры кристалла с двумя ОЛН под действием упругого растяжения. Нагрузка σ возрастает от а к г. Стрелками обозначены векторы J , в доменах. Домены выявлены методом магнитной суспензии

¹ Это крупное зерно в листе трансформаторной стали (Fe-Si (3%)).



В

Рис.5. Доменная структура массивных магнитоодноосных кристаллов на плоскости, параллельной ОЛН (а, б) и перпендикулярной ОЛН (в). Структура выявлена с помощью магнитной суспензии (а, б) и эффекта Керра (в). Стрелками на рис.5а обозначены векторы J ,

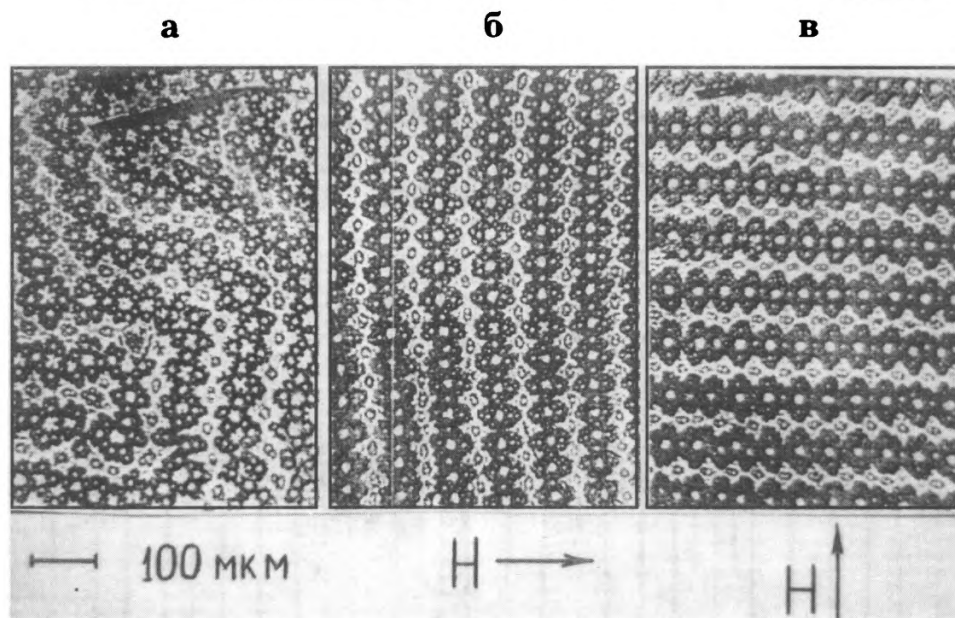


Рис.6. Доменная структура на одном и том же участке магнитоодноосного массивного кристалла в исходном состоянии (а) и после намагничивания до насыщения в направлениях, указанных стрелками (б, в). Домены выявлены с помощью магнитной суспензии

их опознание (расшифровка) вместе с геометрически правильным рисунком доменных границ составляют элементы красоты наблюдаемых картин магнитных доменов. Более богатыми и разнообразными эти картины становятся при других кристаллографических ориентациях плоскости наблюдения ДС. Дополнительную информацию в этом направлении читатель может получить из [4].

3. Хаотические и упорядоченные доменные структуры в массивных магнитоодноосных кристаллах

В кристаллах с одной ОЛН, т.е. магнитоодноосных, на плоскости, параллельной ОЛН, наблюдается совершенно простая, если не сказать — примитивная, картина порошковых фигур (рис. 5а). Здесь доменные стенки разделяют домены с противополо-

жным направлением J_s . Ориентированы они строго вдоль ОЛН. Но при приближении к краю (торцу) кристалла, перпендикулярному ОЛН, картина сильно усложняется. Это видно из рис. 5б. У края образуется целая система доменов из крупных и мелких клиньев; в большом клине виден клин меньшего размера, а в нем еще клинышек. Вся эта «борода» возникает для того, чтобы уменьшить энергию размагничивающего поля (см. разд. 1.2). Понятно, что из-за этой дополнительной поверхностной ДС картина на торце кристалла, т.е. на плоскости, перпендикулярной ОЛН, должна быть сложной. Так и есть. Как видно из рис. 5в, это целое «звездное небо».

Бросается в глаза, что эта фантастически красивая картина ДС, похожая на ковер с богатым рисунком, совершенно неупорядочена. Основ-

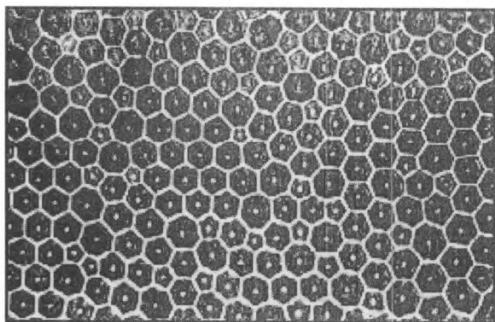


Рис.7. Сотовая доменная структура в магнитоодном кристалле с ОЛН, перпендикулярной плоскости рисунка

ные крупные домены — белые и темные на рис. 5в — изогнуты произвольным образом. Внутри них находятся дополнительные домены различного размера. Так что можно выделить, например, большую темную «звезду», внутри нее — несколько более мелких белых «звезд», а внутри последних — совсем маленькие темные «звездочки». Это своеобразная 3-уровневая иерархия в поверхностной системе дополнительных доменов.

Стенки основных и дополнительных доменов имеют причудливую волнистую форму. Однако экспериментально доказано, что в глубине кристалла стенки из гофрированных становятся гладкими. Для наглядности можно представить себе стенку основного домена как полиэтиленовую пленку, сильно растянутую по краю у верхнего и нижнего торцов кристалла (аналогично — дополнительный домен, как полиэтиленовый фунтик с растянутыми волнистыми краями). Внутри кристалла плоская стенка может поворачиваться как угодно, лишь бы оставалась везде параллельной ОЛН. Если это условие не выполняется, то на стенке возникают магнитные полюсы и соответственно размагничивающее поле, что невыгодно энергетичес-

ки. Таким образом, свобода выбора в ориентации стенок на рис. 5в и отсутствие выбора на рис. 5а и приводят к полному хаосу в ДС в первой картине и строгому порядку во второй.

Естественно, встает вопрос: нельзя ли упорядочить ДС на рис. 5в? Оказывается, можно, если подвергнуть кристалл определенному магнитному воздействию. Например, на рис.6 показана ДС на одном и том же месте кристалла в исходном состоянии (рис. 6а) и после намагничивания в поле, перпендикулярном ОЛН (т.е. параллельном плоскости наблюдения). Видно, что неупорядоченная ДС в исходном состоянии (рис.6а) после намагничивания в таком поле становится упорядоченной полосовой ДС при сохранении сложной поверхностной системы доменов (рис. 6б). Вся картина ДС похожа на ажурное кружево. Если изменить направление поля на 90° , то и ориентация полос изменится тоже на 90° (рис. 6в). Любопытно, что домены выстраиваются не вдоль, а поперек ранее действовавшего поля H . Этот неожиданный эффект «поперечных доменов» был обнаружен нами давно, а исчерпывающее и довольно сложное объяснение ему дано сравнительно недавно.

Добавим еще, что варьируя магнитную предысторию кристаллов-пластин разной толщины L (L — размер вдоль ОЛН), можно создавать самые разнообразные ДС [3]. Среди них есть упорядоченные и неупорядоченные ДС, есть структуры, обладающие своеобразной красотой. Одна из таких ДС — это сотовая ДС (рис.7) с маленьким поверхностным доменом в центре ячеек. При толщинах пластин меньше некоторой критической ($L < L_k$) вся поверхностная дополнительная ДС исчезает, оста-

ются лишь основные сквозные домены. Принято называть кристаллы с $L > L_k$ массивными, а с $L < L_k$ — тонкими. Все кристаллы, ДС которых рассматривается в разд. 4—6, относятся к тонким кристаллам — пленкам (пленкам).

4. Доменные структуры в пленках с перпендикулярной анизотропией

Многочисленные эксперименты показывают, что с уменьшением толщины кристалла-пластинки (пленки)¹ с ОЛН, перпендикулярной плоскости, и с исходной ДС, как на рис.5в, его ДС постепенно упрощается. Наряду с уменьшением ширины основных доменов постепенно, согласно отмеченной в разд. 3 иерархии, исчезают дополнительные поверхностные домены. В итоге вместо ДС, как на рис.5в, формируется ДС, показанная на рис.8. Ее называют лабиринтной ДС. Здесь все

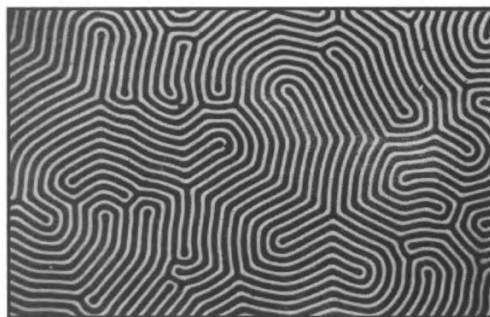


Рис.8. Лабиринтная доменная структура в тонкой пленке с ОЛН, перпендикулярной ее плоскости. Векторы \mathbf{J}_s в белых и черных доменах направлены «к нам» и «от нас». Домены выявлены с помощью эффекта Фарадея

домены сквозные, стенки их ориентируются как угодно, оставаясь при этом везде параллельными ОЛН. Это полностью неупорядоченная, хаотическая ДС, такой она остается и при намагничивании образца в поле \mathbf{H} , направ-

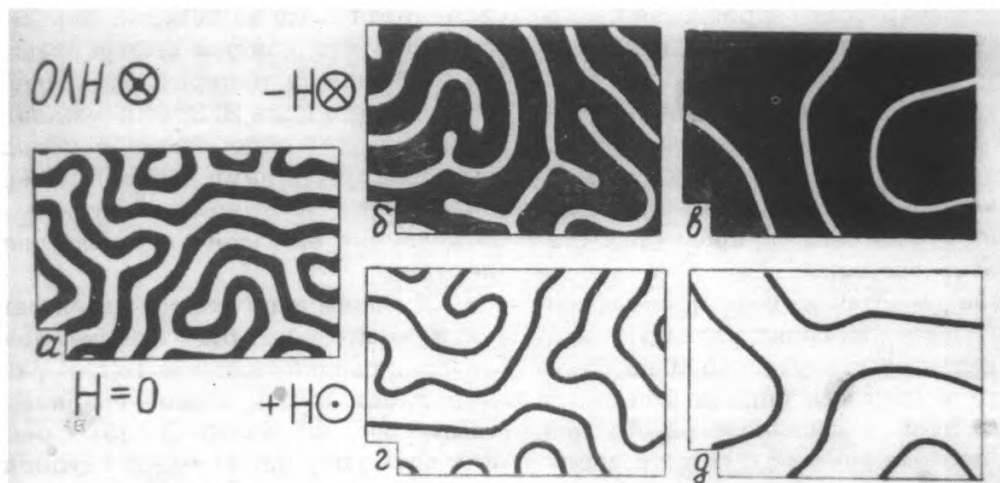


Рис.9. Лабиринтная доменная структура в размагниченном состоянии пленки (а) и в магнитном поле \mathbf{H} , направленном «от нас» (б, в) и «к нам» (г, д). Поле \mathbf{H} увеличивается от (б, г) к (в, д)

¹ Монокристаллическую пластинку вырезают из объемного кристалла и утончают до требуемой толщины любым способом. Тонкую пленку получают напылением, химическим осаждением и т.п. на немагнитную подложку, постепенно увеличивая ее толщину до заданной. Если подложка монокристаллическая, то можно получить и монокристаллическую магнитную пленку.

ленном вдоль ОЛН (рис.9). Можно многократно повторять данный процесс, меняя величину и знак H , при этом положение и форма доменов будут разными. Это следствие изотропности магнитных свойств в плоскости пленки.

На рис. 8 и 9 и на приведенных ниже рис. 10—13 показаны ДС монокристаллических пленок ферритов-гранатов¹ с так называемой перпен-

дикулярной анизотропией. Такой выбор не случаен. Дело в том, что тонкие пленки ферритов-гранатов стали технически важным магнитным материалом. На их основе разрабатываются доменные устройства микроэлектроники и прикладной оптики [5]. Поэтому и их ДС изучена в гораздо большей степени, чем ДС каких-либо других объектов.

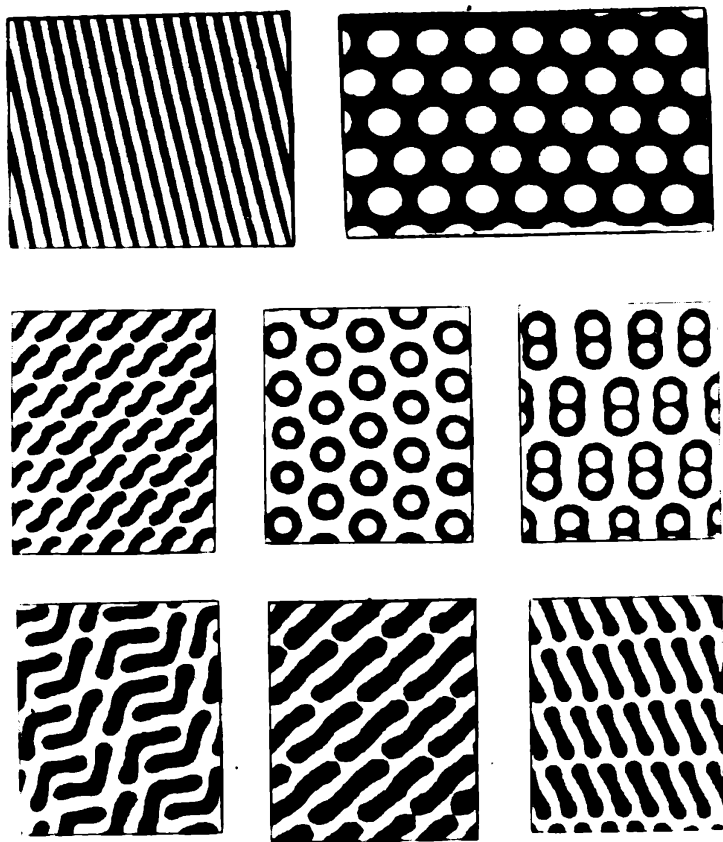


Рис.10. Примеры строго упорядоченных доменных структур в пленках ферритов-гранатов

¹ Кристаллы ферритов-гранатов с общей формулой $R_3Fe_5O_{12}$, где R — редкоземельный элемент, имеют кубическую решетку. Естественная магнитная анизотропия их подобна Ni , т.е. они имеют четыре ОЛН. ДС таких кристаллов очень сложная. В простейшем варианте она рассмотрена в разд.7. При изготовлении пленок ферритов-гранатов в них наводится одноосная анизотропия с ОЛН, перпендикулярной плоскости пленок. Эта анизотропия намного больше естественной. Поэтому монокристаллические пленки ферритов-гранатов имеют лишь одну ОЛН.

Также, как и в случае с массивными кристаллами-пластинами (см. разд. 3), варьируя магнитную предысторию, включив в качестве действующего фактора не только постоянное, но и переменное магнитное поле, можно вместо хаотической ДС (рис.8,9) получить строго упорядоченные структуры различной геометрии. Целый ряд таких структур (см. [6]) показан на рис.10. Эти картины своей простотой и оригинальностью, идеальной симметрией не могут не вызвать эстетического удовольствия. Но этого мало. Такие ДС еще и практически полезны. Действительно, их можно рассматривать как дифракционные решетки, управляемые магнитным полем. На основе полосовой ДС (рис.10) разработаны устройства (дефлекторы) для отклонения световых лучей [5].

5. Динамический хаос и динамическая самоорганизация в системе магнитных доменов

До сих пор мы рассматривали статические ДС, т.е. ДС либо в отсутствие магнитного поля, либо в постоянном поле. Посмотрим теперь на динамические магнитные домены, существующие в переменном поле.

При исследовании ДС пленок ферритов-гранатов в переменном магнитном поле небольшой частоты ($f=10^2 - 10^4$ Гц) было обнаружено совершенно новое явление. Суть его заключается в следующем [7]. В пленке с исходной лабиринтной ДС, как на рис.9а, в переменном, например, синусоидальном поле $H=H_0 \sin 2\pi ft$ ДС будет все время изменяться от состояния, подобного изображенному на рис. 9б, до состояния, похожего на то, что приведено на рис.9г, и наоборот. При боль-

шей амплитуде поля H_0 изменения ДС будут происходить между состояниями, подобными тем, что мы видим на рис.9в,д. Таким образом, в переменном поле H доменные стенки двигаются в разных направлениях и с разными скоростями. Другими словами, в системе доменов реализуется пространственно-временной (динамический) хаос. С увеличением амплитуды H_0 и частоты f движение стенок становится все более и более интенсивным. При наблюдении в микроскоп картина доменов окончательно «расплывается» в серый фон. Но вот при каких-то значениях H_0 и f происходит нечто неожиданное: среди хаоса внезапно возникают крупные, четкие, контрастные многовитковые спиральные домены (рис.11)!

Сам факт образования из хаотической ДС динамических доменов определенной конфигурации свидетельствует о процессах самоорганизации, о том, что беспорядочное движение доменных стенок перешло в упорядоченное колебательное движение около некоторых устойчивых положений равновесия. Еще более примечательной особенностью является то, что спиральный домен, про-

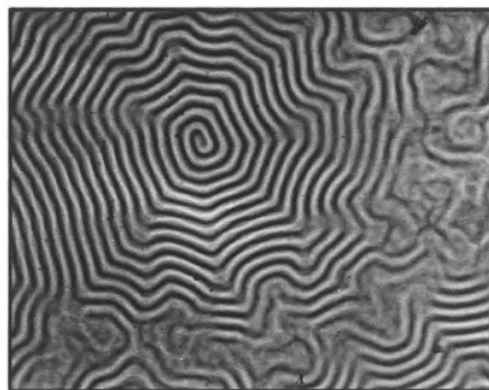


Рис.11. Динамический спиральный магнитный домен, окруженный доменным хаосом

существовав некоторое время T_g (время жизни), внезапно исчезает. Через какой-то промежуток времени T_w (время ожидания) на этом же участке образца возникает новый спиральный домен (или несколько новых) и далее все снова и снова повторяется. Для примера: на рис.12 показаны спиральные домены, существовавшие в разное время на одном и том же участке пленки. Сравнивая рис.11 и 12, видим, что по форме спиральные домены в разных образцах различаются довольно значительно. Отметим, что $f_s = 1/(T_g + T_w)$ — частота появления \leftrightarrow исчезновения спиральных доменов, т.е. частота переходов хаос \leftrightarrow порядок в сотни, ты-

сячи раз меньше частоты переменного поля. Это означает, что спиральные домены надо рассматривать как устойчивые динамические доменные структуры.

Описанное состояние динамической системы магнитных доменов мы назвали ангерным состоянием. Реализуется оно лишь в определенной для каждого образца области значений амплитуд и частот переменного поля. Например, для пленки, спиральные домены которой показаны на рис. 12, эта область ограничена интервалами $H_0 = 6,3 - 6,7$ кА/м и $f = 0,2 - 6$ кГц.

В заключение этого раздела надо сказать, что само наблюдение ангерного состояния — захватывающее зрелище. Нельзя равнодушно видеть, как из хаоса (визуально — из ничего, из серого фона) внезапно рождается красивая многовитковая спираль, медленно «плывет», изменяет свою форму, размер, взаимодействует с другими доменами и... внезапно исчезает. А наблюдатель, затаив дыхание, ждет у микроскопа, что возникнет: или мелкие спирали в 2-3 витка, которые тут же уничтожаются хаосом, или крупная, так и хочется сказать — величественная, долгоживущая, красивая структура, следить за эволюцией которой доставляет массу положительных эмоций.

6. Многообразие динамических доменных структур

Все, что описано в разд. 5, относилось к низкочастотному интервалу ($10^2 - 10^4$ Гц) переменных магнитных полей. Мы расширили диапазон f до 10^5 Гц, сохранив те же объекты исследования (магнитоодноосные пленки ферритов-гранатов с исход-

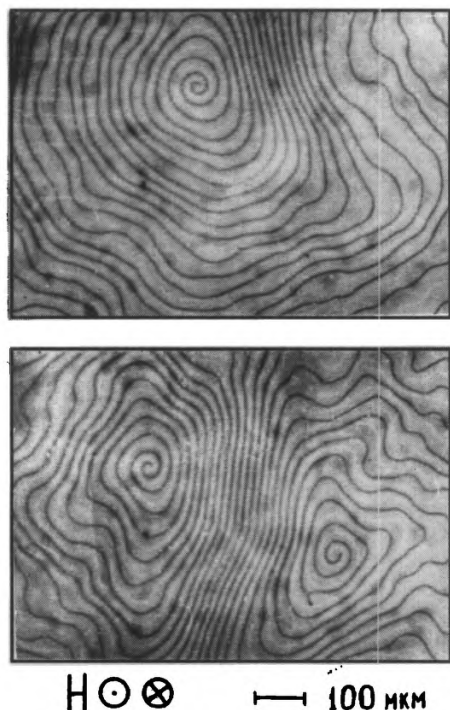


Рис.12. Эволюция спиральных динамических доменов. Фотографии с одного и того же места образца-пленки сделаны последовательно с интервалом в 1 минуту. Частота переменного магнитного поля 300 Гц

ной лабиринтарной ДС (рис.8) и ту же геометрию опыта (образец находится в пространственно однородном, непрерывно действующем синусоидальном переменном поле $H = H_0 \sin 2\pi f t$, направленном по нормали к образцу). И сразу же обнаружилось нового вида устойчивые динамические ДС с новыми свойствами. Оказалось, что в формировании этих ДС существенную роль играют локальные дефекты в образце. Из установленных закономерностей, пожалуй, наиболее примечательная состоит в том, что на одном и том же участке образца удается реализовать целый каскад переходов от одного типа динамической ДС к другому, варьируя лишь параметры переменного поля — амплитуду H_0 и частоту f . Этот факт иллюстрируется

рис.13. Здесь представлена небольшая серия фотографий динамических доменов, снятых при последовательно — от (а) к (г) — увеличивающейся частоте поля от 10 кГц до 100 кГц. Видно, что сначала около дефектов формируются многолучевые «звезды» (рис.13а); потом образуются «пузыри» с крапинками внутри (рис.13б); далее эта структура преобразуется в упорядоченную систему концентрических кольцевых доменов, окруженную хаосом (рис.13 в). Наконец, и эта структура превращается в совершенно другую, радиальную, систему доменов (рис.13г).

Исключительно любопытна «жизнь» этих динамических доменных структур, т.е. поведение их во времени. При наблюдении в микроскоп видно, как «звезды» периодически «мига-

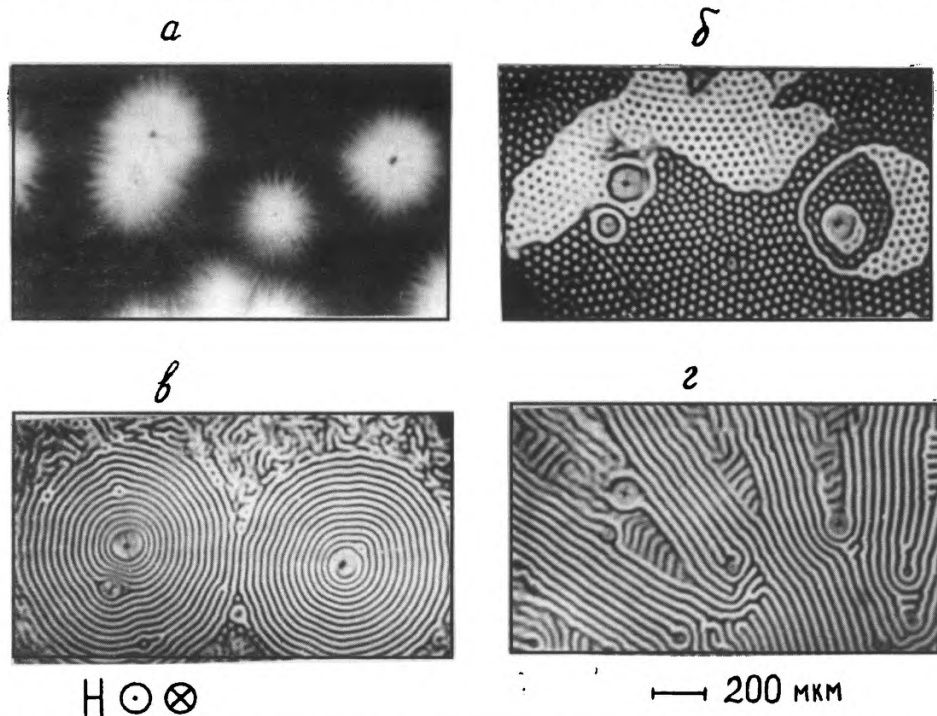


Рис.13. Преобразование динамической доменной структуры, наблюдаемой на одном и том же месте пленки феррита-граната толщиной 9 мкм в переменном магнитном поле. Частота поля увеличивается от (а) к (г)

ют» (лучи укорачиваются \leftrightarrow удлиняются), как «пузыри» разрастаются, отрываются от дефектов и «уплывают» на край образца. Небольшое изменение H_0 и f — и на тех же дефектах начинают периодически зарождаться и расширяться кольцевые домены чередующейся полярности (черные и белые на рис. 13в). Визуально вся картина чрезвычайно похожа на испускание из центра кольцевых концентрических волн. Причем «мигание» звезд, периодическое испускание «пузырей» и кольцевых доменов — это медленные процессы, их частота в десятки и сотни тысяч раз меньше частоты переменного поля. Значит, наблюдаемые ДС являются устойчивыми динамическими системами магнитных доменов. Удивительно еще и то, что при некоторых комбинациях f и H_0 весь образец может оставаться намагниченным в одном направлении. Кристалл как бы перестает «замечать» переменное поле, никак не реагирует на него. Реализуется так называемая динамическая однодоменность.

Предсказать заранее такую резкую трансформацию и вида и свойств динамических доменов не представлялось возможным. Просто для этого не было никаких предпосылок в известных к 90-м гг. представлениям физики магнитных доменов. Так что для исследователя описанное явление — это неожиданный и щедрый подарок природы. Притягательная красота таких динамических доменов, как на рис. 11, не только в их четкости, контрастности, в симметрии одних и «живом», непредсказуемом поведении других, но и в их загадочности. На сегодня никто не знает, почему и как происходят описанные преобразования системы доменов, какие законы управляют их

движением, какие количественные соотношения связывают параметры динамической ДС, параметры переменного поля и характеристики самого магнитного материала. Поиск ответов на эти и подобные вопросы непременно приведет к открытию новых эффектов в динамике системы взаимодействующих доменов и к построению теоретических моделей, адекватных реально наблюдаемым закономерностям.

7. Цветные картины магнитных доменов

Все рассмотренные выше ДС, несмотря на видимую сложность некоторых из них (см., напр., рис. 5в), легко расшифровываются, т.е. определяется ориентация намагниченности в доменах, градусность стенок и т. д. Если кристалл имеет одну ОЛН, то возможны лишь две ориентации векторов J_s , соответственно — две группы доменов (темные и светлые на рис. 5в, 8-13) с противоположным направлением J_s в них. Если кристалл имеет три, а тем более четыре ОЛН, то расшифровка его ДС становится весьма трудной задачей. Тем не менее попробуем рассмотреть ДС магниточетырехосного кристалла. Выберем в качестве примера тонкую монокристаллическую пластинку феррита-граната $(Er, Tb, Gd)_3Fe_5O_{12}$, вырезанную так, что одна из 4 ОЛН перпендикулярна плоскости образца, а три другие наклонены к этой плоскости под углом 20° (см. схему на рис. 14, который помещен на цветной вкладке). Для феррита указанного состава характерна сильная зависимость угла поворота плоскости поляризации света, прошедшего через кристалл, от длины волны света (дисперсия фарадеевского враще-

ния). Это дает возможность при наблюдении ДС в поляризованном белом свете путем подбора ориентации плоскости пропускания анализатора получать цветные картины ДС. При этом оказывается, что каждая группа доменов с одинаковым направлением \mathbf{J}_s имеет свой определенный цвет, а вся картина ДС становится многоцветной (рис.14)¹.

В исходном состоянии (рис.14а) ДС состоит из шести групп полосовых доменов, векторы \mathbf{J}_s в которых ориентированы по наклонным ОЛН (ориентация \mathbf{J}_s вдоль ОЛН, перпендикулярной плоскости, в отсутствие магнитного поля невыгодна энергетически из-за анизотропии формы образца). При этом в 3 группах \mathbf{J}_s имеют составляющую «к нам», а в 3 других — «от нас». Соответственно первые окрашены в разные оттенки светло-красного, а вторые — темно-красного цвета (рис.14а). Последние исчезают в магнитном поле \mathbf{H} , направленном «к нам» (по нормали к образцу). Картина ДС состоит только из светло-красных крупных макродоменов (рис.14б). При дальнейшем увеличении поля \mathbf{H} появляются домены с векторами \mathbf{J}_s , направленными вдоль \mathbf{H} . Они имеют вид полос зеленого цвета (рис.14в). Далее эти домены расширяются (рис.14г) и в некотором поле \mathbf{H}_s достигается намагниченность насыщения. Весь образец становится ярко-зеленым. Кривая намагничивания $J(\mathbf{H})$ имеет двухступенчатую форму (см. схему на рис.14)².

Если образец намагничивать в поле противоположного направления

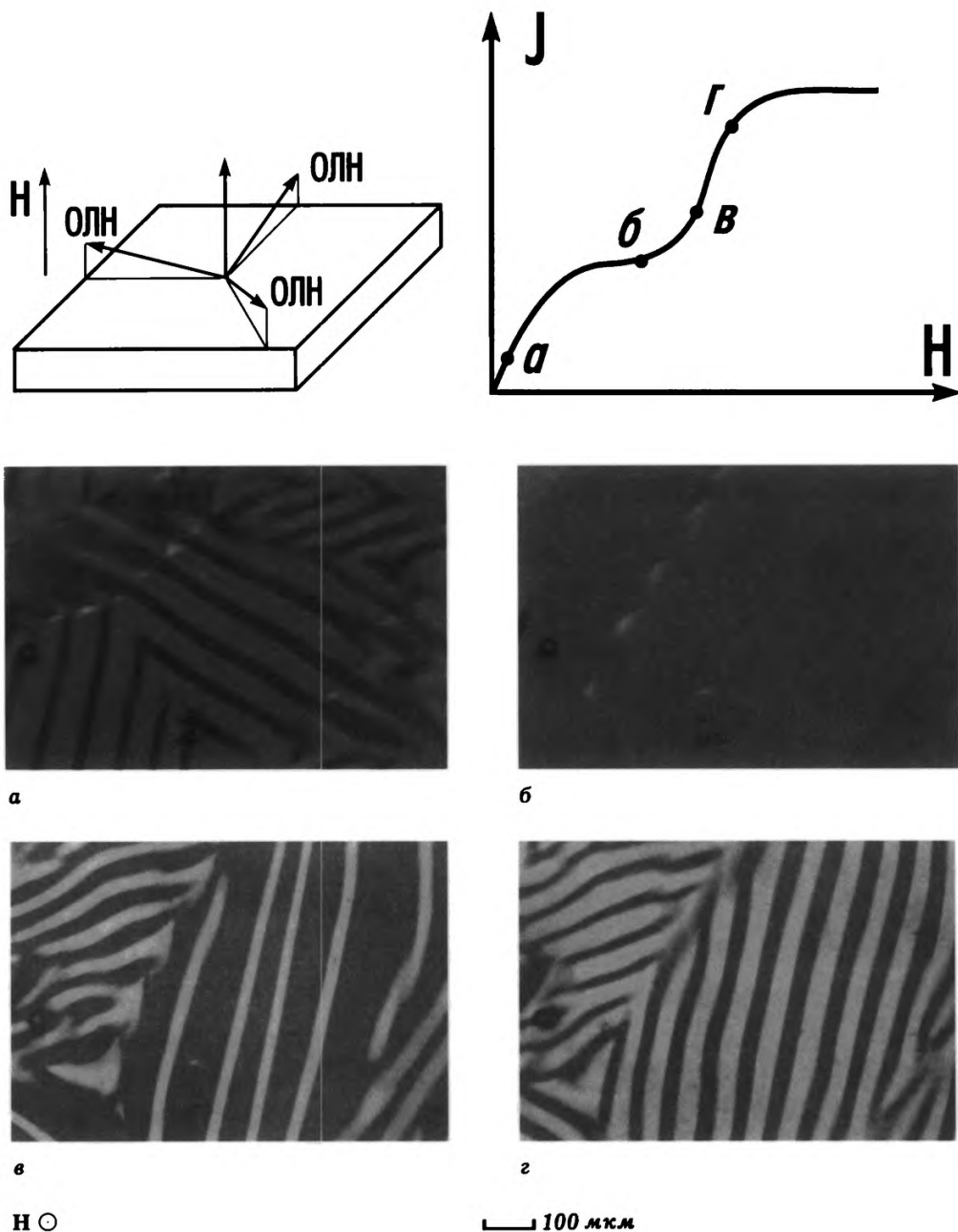
($-\mathbf{H}$), то сначала формируется ДС из темно-красных крупных доменов, потом, с увеличением поля, появляются тонкие полосовые домены желтого цвета, далее они расширяются, и в поле $-\mathbf{H}_s$ достигается намагниченность насыщения. Образец становится ярко желтым.

В другом образце того же состава, но с так называемой комбинационной анизотропией (многоосная плюс сильная наведенная одноосная анизотропия), кристаллографическая ОЛН, перпендикулярная плоскости пластинки, является легкой. Поэтому уже в исходном состоянии (рис.14д) полосовые, домены имеют зеленый и желтый цвета. Намагниченность \mathbf{J}_s в них направлена «к нам» и «от нас». Присутствие наклонных ОЛН (см. схему на рис.14) проявляется в красном ореоле у основных доменов. При намагничивании (рис. 14е, ж) ДС ведет себя как в одноосном кристалле. Однако при снижении поля от $\mathbf{H}_s=115$ Э, т.е. от «зеленого насыщения», сначала возникают и разрастаются (рис. 14з, и) красные домены с \mathbf{J}_s , наклонными к плоскости, и лишь потом, в более слабых полях, появляются желтые домены с \mathbf{J}_s , направленным «от нас» (рис. 14к).

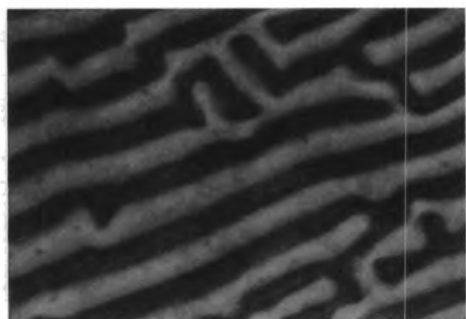
На всех этапах описанной перестройки ДС она расшифрована полностью. Само по себе получение такого значимого научного результата приносит большое удовлетворение исследователю. Но, кроме того, наблюдение «живых» доменов, разукрашенных самой природой, доставляет истинное эстетическое удоволь-

¹ Цветные фотографии, иллюстрирующие изменение ДС магнитногоосного кристалла в магнитном поле публикуются впервые.

² О кривой намагничивания, петле гистерезиса см. [1,2] или: Белов К.П. // Сорос. образов. журн. 1996. № 1. С.94.



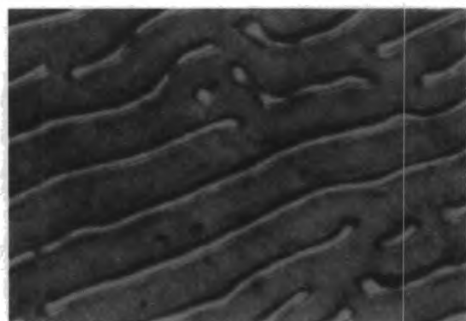
**Рис.14 к статье Г.С.Кандауровой «Хаос, порядок и красота...» (а-г).
Изменение доменной структуры магнитомногоосного кристалла феррита-граната
при его намагничивании. Поле направлено «к нам».
Напряженность поля H равна: а) 0; б) 47; в) 72; г) 90 Э.
Толщина образца-пластинки — 70 мкм.**



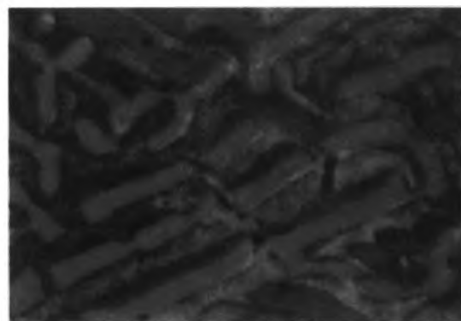
д



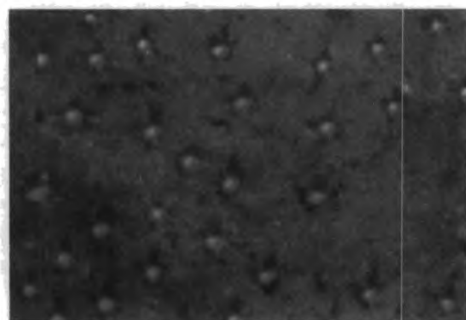
з



е



и



ж



к

**Рис.14 к статье Г.С.Кандауровой «Хаос, порядок и красота...» (д-к).
Изменение в магнитном поле доменной структуры кристалла феррита-граната
с комбинированной магнитной анизотропией.
Напряженность поля H равна: д) 0; е) 87; ж) 105; з) 102, и) 69; к) 20 Э.
Толщина образца-пластинки — 80 мкм.**

ствие. Жаль только, что фотографии на рис. 14 дают весьма слабое представление о той яркой желто-красно-зеленой гамме красок, которая наблюдается на опыте. Не исключено, что в недалеком будущем будет визуализирована объемная ДС прозрачных массивных магнитных кристаллов. Тогда наблюдение цветной картины такой ДС и ее перестройки в магнитном поле будет фантастически красивым зрелищем.

8. Иерархия магнитных доменов в кристаллах с упорядоченной микроструктурой

В этом разделе автор решаетея познакомить читателя, хотя бы поверхностно, с самыми сложными из известных на сегодняшний день магнитными доменными структурами. Такие ДС (их называют кооперативными ДС) формируются в кристаллах с упорядоченной микроструктурой и имеют ярко выраженное иерархическое строение. Простейшую иерархию в системе магнитных доменов в однородных монокристаллах можно заметить на рис. 3 и 14а. На этих рисунках видно, что крупные домены (назовем их макродоменами) состоят из более мелких доменов (условно — микродоменов). Несравненно более сложная многоуровневая иерархия магнитных доменов формируется в кристаллах с упорядоченной микроструктурой, в частности, в наиболее изученных к настоящему времени так называемых полидвойниковых кристаллах.

Рассмотрим, по возможности подробнее, что представляет собой такая структура, тем более что само понятие «кристалл с полидвойниковой микроструктурой» не вышло за рамки специальной литературы. По-

лидвойниковую микроструктуру могут иметь сплавы железо—платина, железо—палладий, кобальт—платина (FePt , FePd , CoPt) и др. Монокристаллы этих сплавов при температуре T выше некоторой критической T_k имеют гранецентрированную кубическую (ГЦК) кристаллическую решетку. При $T < T_k$ равновесной становится гранецентрированная тетрагональная (ГЦТ) решетка. За тетрагональную ось C при переходе ГЦК→ГЦТ выбирается любая из кубических осей $[100]$, $[010]$ или $[001]$. Таким образом, возможны три ориентации C -осей. Обозначим их соответственно C_1 , C_2 , C_3 . Структурное превращение ГЦК→ГЦТ происходит следующим образом. В исходном монокристалле ГЦК фазы возникают зародыши ГЦТ фазы в виде тонких микроскопических пластинок. В каждой из них ось C наклонена к нормали под углом 45° . Из-за различия параметров ГЦК и ГЦТ решеток вокруг зародыша-пластинки возникают упругие напряжения. Для уменьшения упругой энергии рост объема ГЦТ фазы идет путем наращивания на исходную микропластинку-зародыша, например с осью C_1 , следующей пластинки с осью C_2 , наклоненной к нормали под углом 45° . (Такая пара микрокристаллов с общей плоскостью сочленения образует двойник с разориентацией тетрагональных осей в 90°). Далее наслаивается пластинка, подобная первой, потом подобная второй и т. д. В итоге формируется крупная полидвойниковая пластина (ПП).

Очевидно, возможны три типа ПП, в которых чередуются микропластинки с осями C_1 и C_2 , C_2 и C_3 , C_1 и C_3 . Обозначим эти ПП как I, II и III. При дальнейшем превращении ГЦК→ГЦТ полидвойниковые пласти-

ны объединяются в пачки. В каждой пачке также чередуется тип ПП, поэтому возможны три типа пачек, состоящих из пластин I и II, II и III, I и III. В результате самоорганизации формируется сложная полидвойниковая иерархия структурных элементов тетрагональной фазы. Подчеркнем, что исходный монокристалл не превратился в поликристалл. Он стал кристаллом с тетрагональной решеткой и полидвойниковой микроструктурой. Фрагмент такой структуры кристалла FePt показан на рис 15а. Видна пачка из пяти полидвойниковых пластин.

Теперь вспомним, что это ферромагнитный кристалл, в котором тетрагональные оси С являются осями легкого намагничивания (ОЛН). Нетрудно догадаться, что сложной

структурной иерархии будет соответствовать не менее сложная иерархия в системе магнитных доменов. Действительно, каждая микропластинка есть магнитный микродомен. Двойниковая кристаллическая граница между соседними пластинками осями C_1 и C_2 (или C_1 и C_3 , или C_2 и C_3) есть одновременно и магнитная 90-градусная стенка. Но эта стенка в отличие от выше рассмотренных 90-градусных стенок в однородных кристаллах (рис. 2 и 3) ни в каких магнитных полях не смещается. Это «замороженная» стенка. Из микродоменов формируется магнитная макродоменная структура. Каждый макродомен охватывает десятки, сотни и тысячи микродоменов. Макродоменную структуру называют еще кооперативной ДС. Макродомены разделены 180-градусными доменными стенками, как в магнитоодноосных кристаллах (рис. 5а). Эти стенки подвижные, они могут смещаться под действием магнитного поля. Совокупность «замороженных» и подвижных стенок делает перестройку ДС полидвойникового кристалла в магнитном поле своеобразной.

Естественно, что картины доменной структуры будут зависеть от того, какие пачки полидвойниковых пластин пересекает поверхность наблюдения, под каким углом к ней ориентированы оси C_1 , C_2 , C_3 . Множество вариантов здесь приводит к огромному разнообразию наблюдаемых ДС.

На рис. 15б, в для примера показаны фотографии магнитной макродоменной структуры на различных пачках пластин. На рис. 15б зигзагообразная ДС соответствует пачке пластин, микроструктура которых приведена на рис. 15а. На рис. 15в — наиболее упорядоченная макродо-

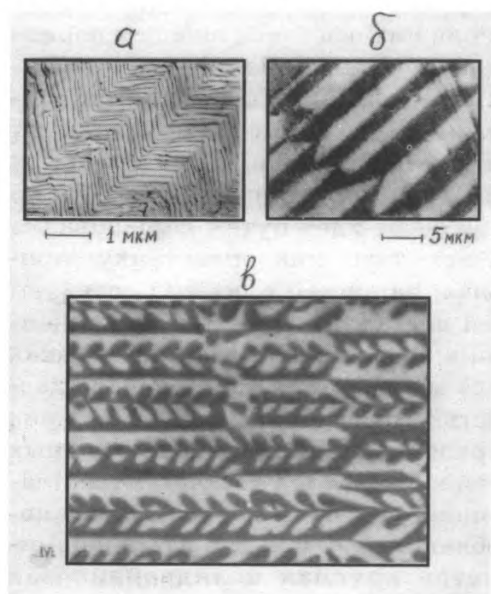


Рис.15. Полидвойниковая микроструктура (а) и магнитная доменная структура (б, в) кристалла FePt, выявленные с помощью электронной микроскопии (а) и магнитооптического эффекта Керра (б, в)

менная (кооперативная) ДС, охватывающая более 10 полидвойниковых пластин в пачке. Зеркальное отображение формы и окраски «лиستиков» в ДС сразу указывает на двойниковую разориентацию ОЛН в соседних пластинах.

Нельзя не обратить внимание на особую красоту доменной структуры на рис. 15в. Здесь есть и строгая периодичность и симметрия в расположении как основных черно-белых зигзагообразных доменов в пачке, так и дополнительных доменов — «листиков», и тонкая прорисовка изящных по форме «листиков» и целых «веточек». Усиливает воспринимаемую красоту уникальность структуры. Действительно, подобные ДС нигде больше не наблюдаются. А сознание того, что за относительно простой картиной макродоменов скрывается сложнейшая совокупность микродоменов и многоуровневая иерархия элементов кристаллической микроструктуры, вызывает восхищение способностью физических систем к самоорганизации.

Для более глубокого знакомства с проблемой кооперативных ДС в кристаллах с полидвойниковой микроструктурой любознательному читателю рекомендую обзорную работу [8].

9. «Замороженные» и нарисованные магнитные домены

В некоторых сплавах для постоянных магнитов (это так называемые магнитотвердые материалы с высокой коэрцитивной силой $H_c[9]^1$) в результате подходящей термической обработки и структурных фазовых

превращений возникает неоднородная (гетерогенная) микроструктура такого типа: в основной магнитной матрице одной кристаллической фазы выделяются мельчайшие частицы другой фазы. Эти частицы создают большие препятствия для смещения доменных стенок, так что стенки оказываются закрепленными в своих положениях. В итоге можно наблюдать совершенно необычные эффекты. Например [9, с.264], после определенной магнитной предыстории гетерогенного магнитоодноосного кристалла $\text{SmCo}_{2,5}\text{Ni}_{2,5}$ в нем создана ДС, которая на базисной поверхности имеет очень красивый вид

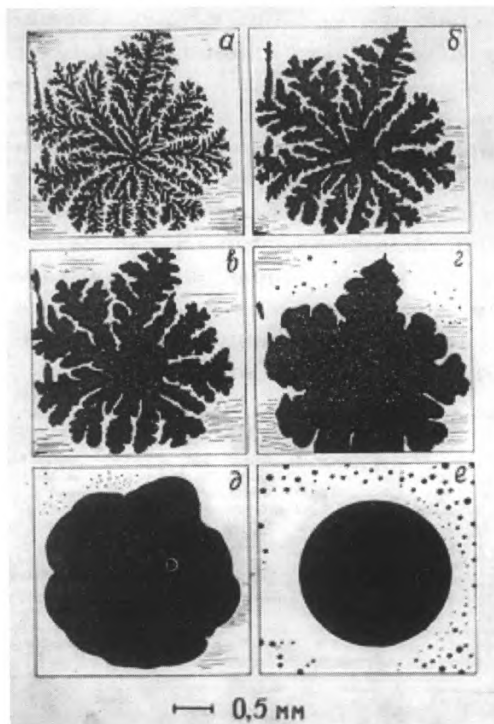


Рис.16. Вид «замороженной» доменной структуры кристалла $\text{SmCo}_{2,5}\text{Ni}_{2,5}$ при последовательном уменьшении его толщины от 3 мм (а) до 2,2 мм (е)

¹ О коэрцитивной силе и петле магнитного гистерезиса см.: Кандаурова Г.С. Природа магнитного гистерезиса // Сорос. образов. журн. 1997. №1.

(рис. 16а). Домен похож на папоротник. Теперь последовательно с кристалла срезается (сошлифовывается) слой за слоем. Соответствующие картины ДС показаны на рис. 16 б-е. По ним можно восстановить всю объемную конфигурацию исходного домена и показать, что во время операции срезания и уменьшения толщины кристалла домен «стоял не шелохнувшись», т.е. он был полностью «заморожен». Этого никак не могло быть, если бы доменные стенки могли свободно смещаться.

В магнитных пленках с перпендикулярной анизотропией также можно создать такую дефектную микроструктуру, при которой смещение стенок будет сильно затруднено. В этом случае после намагничивания до насыщения в поле $+H$, направленном по нормали, пленка остается однодоменной (с $J_s \uparrow +H$) и в отсутствие поля. Если теперь приложить локальное поле $-H_e$, достаточное для того, чтобы перемагнитить данный участок, т.е. создать домен с обратным направлением намагниченности J_s , то этот домен сохранится

и после выключения поля $-H_e$. Понятно, что обратный домен (или домены) можно сделать по форме любым. Например, как показано в [5], на пленке феррита-граната с перпендикулярной анизотропией и высокой коэрцитивной силой H_c магнитным карандашом можно рисовать любые картины.

Другой пример представлен на рис. 17. Здесь показан процесс перемагничивания кристалла-пластинки, у которого создан очень тонкий поверхностный магнитотвердый слой с высокой коэрцитивной силой H_c . В этом слое записан (нарисован) обратный домен в виде заглавной буквы «В». При приложении и изменении поля картина ДС меняется своеобразно: то видна одна буква, как она записана, то вокруг нее появляется хаотическая ДС, то изображение буквы начинает «худеть» и от нее остаются лишь жалкие остатки. Для того чтобы понять, какому магнитному состоянию образца соответствует та или иная картина ДС, на схеме петли гистерезиса обозначены

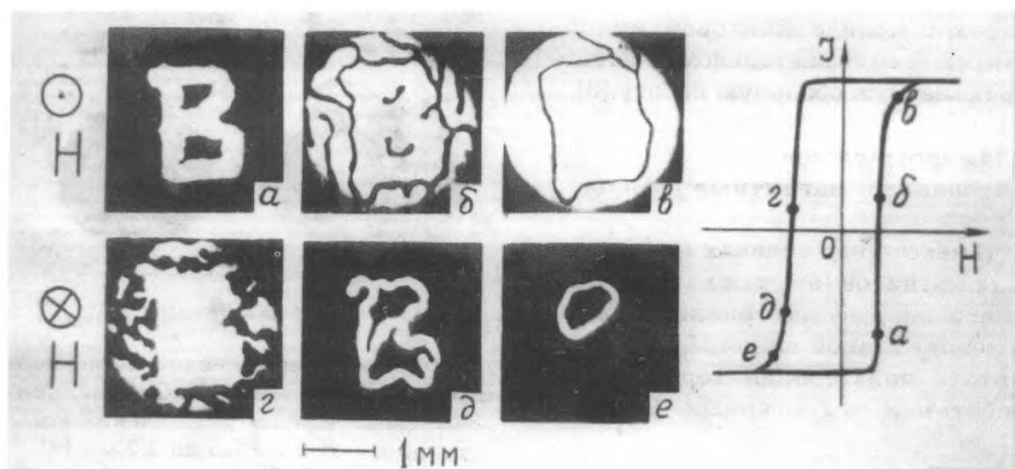


Рис.17. Изменение вида нарисованного домена в магнитном поле H разной величины и ориентации. Векторы J_s в белых и черных доменах направлены «к нам» и «от нас».

точки, приблизительно соответствующие фотографиям ДС.

Нарисованные в [5] или на рис. 17 картины ДС — черно-белые. Однако, ссылаясь на результаты наблюдения цветных ДС (см. разд. 7), можно поверить, что создание на магнитных слоях (пленках) многоцветных сюжетных картин, причудливым образом изменяющихся («живущих») в магнитном поле, не является фантазией.

В отличие от произвольной ДС на рис. 17, которая имеет, пожалуй, лишь некоторую эстетическую и познавательную ценность, можно создавать искусственно такие доменные структуры, которые важны и полезны для техники. Например, с помощью специальных обработок на пленке феррита-граната создают периодическое распределение островков-ячеек с повышенной коэрцитивной силой. После соответствующего намагничивания ячейки сохраняют однодоменные состояния с вектором J_z , направленным «к нам» или «от нас». При визуализации они будут либо черными, либо белыми (рис.18). Ячейки окружены естественной лабиринтной (хаотической) доменной структурой, которая создает в сред-

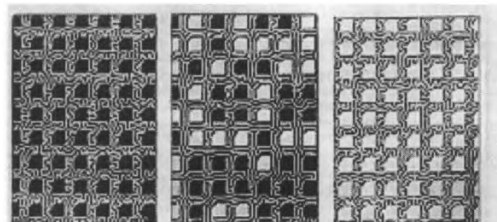


Рис.18. Фрагменты структуры с различным порядком переключения доменных ячеек. Окружает ячейки хаотическая, лабиринтная ДС. Намагниченность в белых и черных доменах направлена «к нам» и «от нас». Размер ячейки 50 мкм

нем серый фон. Понятно, что, управляя состоянием ячеек, можно записать из этих черных и белых точек любое изображение, любую знаковую информацию. Эта возможность реализована в так называемых магнитооптических управляемых транспарантах. (Обширные сведения о практическом применении многодоменных магнитных сред в прикладной магнитооптике приведены в [5]).

Заключение

Раскрывая обозначенную тему статьи, мы вместе с читателем рассмотрели разнообразные статические и динамические доменные структуры магнитных монокристаллов с одной или несколькими осями легкого намагничивания. Среди этих ДС были очень красивые структуры и не очень; очень сложные, едва поддающиеся расшифровке, но полностью упорядоченные, и, наоборот, простые сквозные, понятные, но совершенно хаотические; были идеально упорядоченные системы полосовых, цилиндрических, кольцевых и других доменов, образующих «живые» (управляемые магнитным полем) дифракционные решетки; встречались ДС, в которых основные домены и весьма причудливые по форме дополнительные домены вместе образуют упорядоченный доменный массив; были относительно простые кооперативные ДС, составленные из микро- и макродоменов в монокристаллах и чрезвычайно сложные с многоуровневой иерархией кооперативные ДС в кристаллах с полидвоникой микроструктурой.

Мы увидели в черно-белом или цветном изображении, как происходит процесс намагничивания образцов с различной естественной и даже

искусственно созданной ДС; как преобразуется ДС при вариации магнитной предыстории испытуемых кристаллов. Наконец, мы узнали о новом явлении — ангерном состоянии многодоменной среды, об удивительном поведении системы магнитных доменов в переменном поле, когда из хаоса возникают, «живут», а затем исчезают в хаосе великолепные упорядоченные ДС; увидели разнообразие динамических структур и их способность к взаимным превращениям.

Однако нельзя думать, что приведенными в статье картинками ДС исчерпаны возможности иллюстрации хаоса, порядка и красоты на новых примерах. Мир магнитных доменов настолько богат, что такие возможности поистине неограничены. Например, можно было бы показать ДС миниатюрных нитевидных монокристаллов. Их ДС имеет идеально правильную геометрию и похожа на ажурную объемную конструкцию, вписанную в естественную огранку кристалла.

Не менее интересна ДС монокристаллов с комбинированной магнитной анизотропией (одноосная плюс трех- или четырехосная). Наиболее примечательны так называемые мультиплетные цилиндрические домены. Под действием магнитного поля в каждом таком домене может дискретно (скачком) меняться его состояние — ориентация намагниченности и, соответственно, окраска в цветной картине ДС, но при этом сам он остается на одном и том же месте.

Совсем не представлены в статье ДС тонких магнитных пленок с осью легкого намагничивания в плоскости пленок. Именно на таких объектах можно было бы продемонстрировать постепенный переход от доменных структур к красивейшим микромагнитным структурам и наоборот. При этом неминуемо встал бы вопрос о внутренней структуре доменных стенок. Это настолько важная и актуальная тема, что она требует специального рассмотрения¹.

1. Вонсовский С.В. Магнетизм. М., 1984.

2. Барьяхтар В.Г., Иванов Б.А. В мире магнитных доменов. Киев, 1988.

3. Кандаурова Г.С., Оноприенко Л.Г. Основные вопросы теории магнитной доменной структуры. Свердловск, 1977.

4. Зайкова В.А., Старцева И.Е., Филипов Б.Н. Доменная структура и магнитные свойства электротехнических сталей. М., 1992.

5. Рандошкин В.В., Червоненкис А.Я. Прикладная магнитооптика. М., 1990.

6. Лисовский Ф.В., Мансветова Е.Г., Пак Ч.М. Сценарии упорядочения и структура самоорганизующихся двумерных массивов доменов в тонких магнитных пленках // Журн. эксперимент. и теорет. физики. 1995. Т.8, вып. 5(9). С.1031.

7. Кандаурова Г.С., Свидерский А.Э. Процессы самоорганизации в многодоменных магнитных средах и формирование устойчивых динамических структур // Журн. эксперимент. и теорет. физики. 1990. Т.97, вып.4. С. 1218.

8. Власова Н.И., Кандаурова Г.С., Оноприенко Л.Г., Щеголева Н.Н. Кооперативные доменные структуры в высокоанизотропных сплавах с двойниковой микроструктурой // Успехи физических наук. 1992. Т.162, вып.5. С.161.

9. Мишин Д.Д. Магнитные материалы. М., 1991.

¹ Автор искренне благодарит Н.А. Лобашеву и А.А. Русинову за помощь в подготовке статьи, а также всех своих коллег, любезно подаривших фотографии различных доменных структур из опубликованных ранее работ.